

การพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจาก *Bacillus subtilis* โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทาง
การเกษตร และการประเมินประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด
Development of Pelletized Bioformulation from *Bacillus subtilis* Using
Agricultural Waste Materials and Evaluation of Its Effects on Lettuce Growth

ฮุสนา ทีมุง^{1*}, อัญรินทร์ ภูมีสุข², ซูไฮมิน เชห์มะลี³, และ นริศรา ดารากัย⁴
Husna Teemung^{1*}, Anyarin Phumeesuk², Suhaimin Chehmalee³ and Narissara Darakai⁴

¹สำนักวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

²สาขาเคมี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

³คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยฟาฏอนี จังหวัดปัตตานี 94160 ประเทศไทย

⁴บริษัท กาตินา เนเชอรัล โปรดักส์ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000 ประเทศไทย

¹Research and Innovation Institute, Fatoni University. Pattani Province, 94160, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Education, Fatoni University. Pattani Province, 94160, Thailand

³Faculty of Science and Technology, Fatony University. Pattani Province, 94160, Thailand

⁴Katina natural product co., ltd Nakhon Si Thammarat Province, 8000, Thailand

Submitted 17/04/2026 ; Revised 21/05/2026 ; Accepted 28/05/2026

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมาก เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมสารเคมีในสิ่งแวดล้อมและดินเสื่อมคุณภาพ จึงมีการพัฒนาสารชีวภัณฑ์ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจากเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* โดยตรึงเชื้อบนวัสดุตัวกลางจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชี้อย่างพารา และขี้ข้าวโพดบดละเอียด พร้อมศึกษาคุณสมบัติและประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจริงในการปลูกพืช โดยใช้การจัดพรีเมนต์แบบแฟกทอเรียลและวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ผลการศึกษาพบว่าเชื้อแบคทีเรียมีอัตราการรอดชีวิต 6.3×10^6 cfu/g และอัตราส่วนการเคลือบสารไฮโดรเจลจากขี้ข้าวโพดที่เหมาะสม คือ 1:1 ไม่พบสารพิษตกค้างในกลุ่มสารเคมีทั้ง 7 กลุ่ม และมีอัตราการรอดชีวิตของเซลล์ $46.44 \pm 2.78\%$ อีกทั้งยังมีสมบัติทางกายภาพและมีปริมาณธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม กำมะถัน และไนโตรเจนที่เหมาะสม เมื่อทดสอบกับผักสลัด 3 ชนิด ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว โรเมน และผักสลัดสีแดง โดยเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวกับปุ๋ยอินทรีย์ผสมสารชีวภัณฑ์ พบว่าสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (MANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่าชนิดพืช สูตรปุ๋ย และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: สารไฮโดรเจลจากขี้ข้าวโพด สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด ชี้อย่างพารา

*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding author)

E-mail: Husnateemung@gmail.com

Abstract

Currently, large amounts of chemical fertilizers are used to increase agricultural productivity, resulting in the accumulation of chemical residues in the environment and the deterioration of soil quality. Therefore, environmentally friendly bioformulations have been developed as alternative agricultural inputs. This research aimed to develop a pelletized bioformulation from *Bacillus subtilis* by immobilizing the bacteria on carrier materials derived from agricultural wastes, including rubberwood sawdust and finely ground corncobs. The study also investigated the properties of the bioformulation and evaluated its practical efficiency in plant cultivation using a factorial experiment in a completely randomized design (CRD). The results showed that the bacterial survival rate was 6.3×10^6 cfu/g, and the optimal coating ratio of corncob-derived hydrogel was 1:1. No toxic chemical residues from any of the seven chemical groups were detected, and the cell survival rate was $46.44 \pm 2.78\%$. In addition, the bioformulation exhibited suitable physical properties and essential nutrient contents. The bioformulation was tested on three types of lettuce, namely green leaf lettuce, romaine lettuce, and red leaf lettuce, by comparing the use of organic fertilizer alone with organic fertilizer supplemented with the bioformulation. The results demonstrated that the bioformulation significantly promoted plant growth. MANOVA and one-way ANOVA analyses revealed that plant type, fertilizer formulation, and the interaction between these two factors significantly affected shoot length and plant weight.

Keywords: corncob-based hydrogel, pelletized bioproduct, rubber wood sawdust

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด เช่น ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน และทุเรียน เป็นต้น การผลิตพืชเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยการผลิตที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยซึ่งปัจจุบันมีทั้งปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยชีวภาพ [1] อย่างไรก็ตาม เกษตรกรส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาปุ๋ยเคมีเป็นหลักเนื่องจากให้ผลตอบสนองรวดเร็ว โดยในปี พ.ศ. 2568 ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.7 หรือประมาณ 4.7 ล้านตัน อันเนื่องมาจากการขยายพื้นที่เพาะปลูกและสภาพภูมิอากาศที่เอื้ออำนวยต่อการผลิตพืชเศรษฐกิจ [2] แม้ว่าปุ๋ยเคมีจะช่วยเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้ในปริมาณสูงและต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อคุณภาพดิน สิ่งแวดล้อม และความปลอดภัยของผู้บริโภค ทำให้ปัจจุบันมีความสนใจในการใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพเพิ่มมากขึ้น โดยพื้นที่เกษตรอินทรีย์ของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทั้งพืชเศรษฐกิจหรือการปลูกผักต่าง ๆ และภาครัฐมีเป้าหมายขยายพื้นที่เกษตรอินทรีย์ให้ถึง 2 ล้านไร่ภายในปี พ.ศ. 2570 [3]

แนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการลดการใช้สารเคมีและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต คือ การใช้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อพืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ซึ่งสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคพืชได้ โดยเฉพาะแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่มีความสามารถในการสร้างสารปฏิชีวนะ เอนไซม์ และฮอร์โมนพืช เช่น indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งช่วยกระตุ้นการพัฒนาระบบรากและเพิ่มการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช [4] อย่างไรก็ตาม การนำจุลินทรีย์มาใช้ในภาคสนามจำเป็นต้องมีวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้เชื้อมีความคงทนสามารถปลดปล่อยสู่ดินได้อย่างต่อเนื่อง การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชีเลื่อยยางพารา และซังข้าวโพด เป็นวัสดุตัวกลางนับเป็นแนวทางที่มีศักยภาพเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอินทรีย์วัตถุสูง ช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน กักเก็บความชื้น และเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังช่วยลดมูลค่าให้กับของเหลือใช้ทางการเกษตรและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากนี้โรคพืชที่เกิดจากเชื้อราในดิน เช่น *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp. และ *Phytophthora* spp. เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตพืชเศรษฐกิจลดลงในประเทศไทย การใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีจุลินทรีย์ปฏิปักษ์จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการควบคุมโรคพืชอย่างปลอดภัยและยั่งยืน [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาสารชีวภัณฑ์ตรึงเชื้อแบคทีเรียตัวกลางจากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับการเคลือบสารไฮโดรเจล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารและช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างเหมาะสมและต่อเนื่อง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของปุ๋ยสารชีวภัณฑ์
2. เพื่อศึกษาการคงอยู่ของเชื้อและการประเมินประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตภายใต้สภาพการปลูกจริงในการแปลงเกษตรอินทรีย์ ณ ฟาร์มอาร์ออร์แกนิก อำเภอรามัน จังหวัดยะลา

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างการขึ้นรูปปุ๋ยสารชีวภัณฑ์

นำตัวอย่างซีลี้อย่างพาราและซังข้าวโพดบดละเอียดมาฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อใช้ในการผสมกับเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ที่มีปริมาณความเข้มข้น 10^8 cfu/g ซึ่งเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ tryptic soy broth หลังจากบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวไปผสมกับผงซีลี้อย่างพาราและซังข้าวโพดในอัตราส่วน 100 มิลลิกรัม ต่อผงซีลี้อย่างพารา 200 กรัม และต่อซังข้าวโพด 200 กรัม ทำการบ่มเชื้อเป็นเวลา 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการอัดเป็นเม็ดของปุ๋ยสารชีวภัณฑ์อบแห้ง จากนั้นนำไปเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดต่อไป

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดซังข้าวโพด

การเตรียมสารสกัดซังข้าวโพดโดยนำซังข้าวโพดมาต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการกรองตัวอย่างสารสกัดที่ได้ แล้วนำสารสกัดซังข้าวโพดผสมกับสาร มอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 25 : 50, 50 : 50 และ 75 : 50 ตามลำดับ และนำตัวอย่างดังกล่าวผ่านความร้อน 800 วัตต์เป็นระยะเวลา 1 นาที ทำให้ตัวอย่างเป็นเจลไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการเคลือบวัสดุตัวกลางต่อไป

การทดสอบลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพและเคมี

นำสารสกัดที่เตรียมจากซังข้าวโพดไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (ColorFlex® EZ colorimeter, HunterLab, USA) โดยการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) สีแดง/สีเขียว (a^*) และ สีเหลือง/สีน้ำเงิน (b^*) และวัดค่าความต่างของสี (ΔE^*) ดังสมการที่ 1

การทดสอบความเป็นกรดต่างในตัวอย่างใช้เครื่องวัดพีเอช (pH meter) โดยการนำตัวอย่าง 1 กรัมต่อน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ทำการผสมเข้าด้วยกัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ทำการวัดความเป็นกรด-ต่าง โดยเครื่องวัดพีเอช (pH meter) และทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

ΔL^* , Δa^* และ Δb^* คือ ความต่างระหว่างพารามิเตอร์สีของตัวอย่าง และพารามิเตอร์สีของตัวอย่างที่เป็นชุดควบคุม

การทดสอบการระคายเคือง

การศึกษาการระคายเคือง (skin irritation) ด้วยวิธี *In vitro* skin irritations: reconstructed human epidermis test method [7]

การทดสอบสารพิษตกค้าง

ทำการทดสอบสารพิษตกค้าง จำนวน 7 กลุ่ม ได้แก่ organochlorine group, organophosphate group, pyrethroid group, carbamate group, multiresidue, paraquat และ glyphosate โดยวิธีการทดสอบ In-house method based on QuEChERS method by GC-FPD technique ตามลำดับ [8]

การทดสอบจุดละลายและจุดเดือด

การทดสอบจุดละลาย ชั่งตัวอย่าง 5-10 มิลลิกรัม ใส่ในกระชอนอลูมิเนียมและปิดฝา (crimp) ให้แน่น จากนั้นทำการโหลตัวอย่างและการอ้างอิงโดยการตั้งโปรแกรมอัตราการช่วงอุณหภูมิเริ่มวัดและบันทึกการไหลของความร้อนต่ออุณหภูมิ และทำการวิเคราะห์โดยระบุอุณหภูมิเริ่มต้นอุณหภูมิสูงสุด และเอนทัลปีของการเผาไหม้ (จุดต่อกรัม)

จุดเดือด การนำปฏิกิริยาสารบริสุทธิ์ใส่ลงในเครื่องวัดจุดเดือดหรือภาชนะสำหรับการกลั่น และตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งเจือปนหรือสิ่งแปลกปลอมปนในตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดจุดเดือดตามความดันบรรยากาศและวัดจุดเดือดภายใต้แรงดันลด นำการแปลงค่าจุดเดือดที่แรงดันต่าง ๆ ไปเทียบกับที่ 1 บรรยากาศ โดยใช้สมการคลอเซียส-คลาเปียร์รอง (Clausius-Clapeyron equation) หรืออ้างอิงค่าที่ได้จากสมการเพื่อหาจุดเดือดที่ความดันมาตรฐาน

ความดันไอระหว่าง 20-25 องศาเซลเซียส โดยการจัดเตรียมตัวอย่างในขวดขนาดเล็ก ปริมาณเพียงพอสำหรับแต่ละอุณหภูมิ เวลา และทำการวางขวดแก้วขนาดเล็กลงในเครื่องวัดสารตัวอย่างอัตโนมัติชนิดเฮดสเปซ (headspace) ตั้งอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำการทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นให้โปรแกรมเฮดสเปซฉีดก๊าซเข้าเครื่องวิเคราะห์เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) เพื่อวัดจุดสูงสุดของสารระเหย วัดพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของสารในตัวอย่างและเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ทราบค่า (calibration standard) เพื่อคำนวณความเข้มข้นในพื้นที่ว่างเหนือของเหลวหรือของแข็งภายในภาชนะปิด (โมลต่อลูกบาศก์เมตร) ดังสมการที่ 2

$$P = cRT$$

สมการที่ 2

โดยที่ P = ความดันย่อย (ปาสกาล)

c = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในรูปไอ (ก๊าซ) ภายในช่องว่างเหนือของตัวอย่างในภาชนะปิดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

R = ค่าคงที่แก๊ส (8.314 จูลต่อโมลเคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

การทดสอบการกักต้อน จุ่มเม็ดปุ๋ยลงในสารละลายแต่ละชนิดในภาชนะแยกกันและใช้ฝาหรือพลาสติกปิดสนิทเพื่อป้องกันการปนเปื้อนและการระเหยของสาร จากนั้นเก็บภาชนะให้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดยควบคุมให้น้ำในสารละลายครอบคลุมเม็ดปุ๋ยและขึ้นตัวอย่างทั้งหมด เมื่อครบระยะเวลา 7, 14 หรือ 28 วัน นำชิ้นตัวอย่างออกจากสารละลายล้างเบา ๆ ด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้ง จากนั้นถ่ายภาพพื้นผิวก่อนและหลังการทดสอบ ทำความสะอาดและชั่งน้ำหนักก่อน (W_i) และหลัง (W_f) การกักต้อน และคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก ($\Delta W = W_i - W_f$) และอัตราการกักต้อน ตามสูตรที่กำหนด

การทดสอบปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ

ทำการทดสอบหาปริมาณธาตุสำคัญ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซัลเฟอร์ เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสงแบบพลาสมาเหนี่ยวนำ (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ICP-OES) และวิเคราะห์ไนโตรเจน โดยใช้วิธีเคลดาล์ (Kjeldahl method)

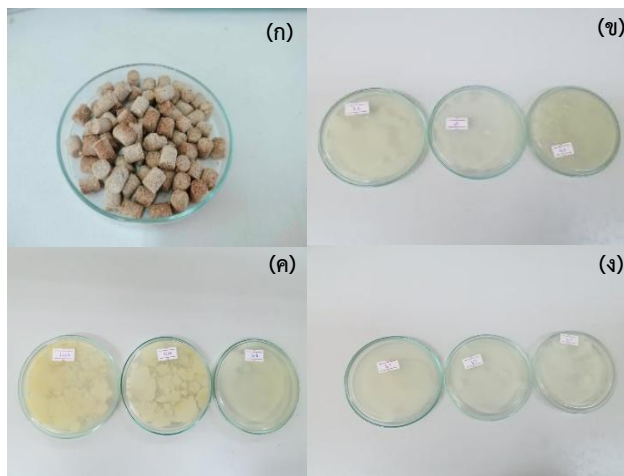
การทดสอบการใช้งานจริง

การทดสอบการเพาะปลูกดำเนินการโดยนำปุ๋ยชีวภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการปลูกผัก ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง ภายใต้สภาพการปลูกจริง ณ อาร์อร์แกนิคฟาร์ม อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 1 เดือน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของปุ๋ยชีวภัณฑ์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ทำการศึกษานี้ใช้การจัดทรีตเมนต์แบบแฟกทอเรียล (factorial arrangement) และวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ขนาด 3×2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดพืชและรูปแบบการใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยประกอบด้วย 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 ชนิดของพืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง ปัจจัยที่ 2 รูปแบบการใช้สารชีวภัณฑ์ผสมกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวและการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ผสมสารชีวภัณฑ์ จากการรวมปัจจัยข้างต้น ทำให้มีรูปแบบการทดลองทั้งหมด 6 รูปแบบ (treatments) โดยแต่ละรูปแบบการทดลองมีจำนวนซ้ำทั้งหมด 100 ซ้ำ รวมหน่วยทดลองทั้งสิ้น 600 ต้น โดยทำการเก็บข้อมูลความยาวต้นและน้ำหนักต้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (multivariate analysis of variance, MANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างในภาพรวมของตัวแปรตามระหว่างกลุ่มทดลองทั้ง 6 รูปแบบ และหากพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) แยกตามแต่ละตัวแปรตาม เพื่อพิจารณาความแตกต่างอย่างละเอียด พร้อมทั้งเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยใช้โปรแกรมทางสถิติสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 26 ในการคำนวณผล

ผลการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างการขึ้นรูปปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ที่ผสมเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ในตัวอย่างขี้เลื่อยยางพาราและขี้ขำโพด

จากการทดสอบอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* หลังจากบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยลักษณะการอัดเม็ดปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ที่มีเชื้อแบคทีเรีย (ภาพที่ 1ก) และเมื่อทดสอบปริมาณการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียมีระดับความเข้มข้นที่ 6.3×10^6 CFU/g (ภาพที่ 1ข-ง)



ภาพที่ 1 (ก) ลักษณะเม็ดสารชีวภัณฑ์จากเชื้อแบคทีเรียที่มาจากตัวอย่างสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่มีการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด (ข) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 1 เดือน (ค) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 2 เดือน (ง) การทดสอบอัตราการรอดชีวิตของระยะเวลา 3 เดือน

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และการเคลือบสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด

การทดสอบลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพและเคมี

ลักษณะทางกายภาพของสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดเป็นทรงกระบอก ผิวด้านนอกมีลักษณะการเคลือบสารไฮโดรเจล มีสีน้ำตาลอ่อนเทา มีกลิ่นคล้ายวัสดุอินทรีย์ธรรมชาติ คล้ายกลิ่นหมักอ่อน ๆ ที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย และในส่วนของคุณลักษณะสีที่ปรากฏของสารชีวภัณฑ์ ได้ดำเนินการวิเคราะห์โดยนำสารสกัดที่เตรียมจากขิงข้าวโพดไปวัดค่าสีเครื่องวัดสี รายงานผลตามมาตรฐาน CIE โดยรายงานเป็นหน่วยสี CIE $L^*a^*b^*$ โดย L^* บ่งบอกความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว) a^* บ่งบอกเฉดสี ($-a^*$ = เขียว, $+a^*$ = แดง) b^* บ่งบอกโทนสี ($-b^*$ = น้ำเงิน, $+b^*$ = เหลือง) พบลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน ดังตารางที่ 1 และในส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารสกัดขิงข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 5.30 ± 0.000

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าสีของสารสกัดขิงข้าวโพดและสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด

ตัวอย่าง	ค่าวิเคราะห์ค่าสี (mean $\pm$ S.D)			
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
ขิงข้าวโพด	17.52 ± 2.04^c	8.25 ± 1.25^a	19.40 ± 2.15^a	3.21 ± 0.39^c
สารสกัดขิงข้าวโพด	22.17 ± 1.43^a	2.26 ± 1.43^b	7.95 ± 1.83^b	12.03 ± 1.43^b

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าสีของสารสกัดขิงข้าวโพดและสารไฮโดรเจลจากสารสกัดขิงข้าวโพด (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าวิเคราะห์ค่าสี (mean $\pm$ S.D)			
	L*	a*	b*	ΔE^*
3% สารมอล โทเดกซ์ทรีน	21.75 $\pm$ 1.10 ^{ab}	2.47 $\pm$ 0.56 ^b	7.81 $\pm$ 1.27 ^b	13.12 $\pm$ 1.71 ^a
5% สารมอล โทเดกซ์ทรีน	22.10 $\pm$ 1.38 ^a	2.25 $\pm$ 0.66 ^b	6.94 $\pm$ 1.02 ^b	14.08 $\pm$ 1.64 ^a
7% สารมอล โทเดกซ์ทรีน	21.23 $\pm$ 1.22 ^b	2.86 $\pm$ 0.61 ^b	7.90 $\pm$ 1.00 ^b	12.69 $\pm$ 1.55 ^{ab}

การทดสอบการระคายเคืองโดยการศึกษาเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์

ผลการทดสอบการระคายเคืองโดยประเมินจากเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์พบว่า สารสกัดจากตัวอย่างทุกระดับความเข้มข้น (25–100 เปอร์เซ็นต์) แสดงการระคายเคืองในระดับต่ำถึงปานกลาง โดยมีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์อยู่ในช่วง 46.44–59.16 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดลดลง ขณะที่ตัวอย่างควบคุมบวกแสดงการระคายเคืองรุนแรงด้วยเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์ต่ำมาก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบการระคายเคือง

ตัวอย่าง	เชิงคุณภาพ (เกรด)	เชิงปริมาณ % การรอดชีวิตของเซลล์ เฉลี่ย $\pm$ S.D.
สารสกัดจากตัวอย่าง 100 เปอร์เซ็นต์	2	46.44 $\pm$ 2.78
สารสกัดจากตัวอย่าง 75 เปอร์เซ็นต์	2	52.78 $\pm$ 2.03
สารสกัดจากตัวอย่าง 50 เปอร์เซ็นต์	2	57.41 $\pm$ 1.72
สารสกัดจากตัวอย่าง 25 เปอร์เซ็นต์	2	59.16 $\pm$ 2.96
ตัวอย่างควบคุม	0	100.00
ตัวอย่างควบคุมลบ	0	95.68 $\pm$ 0.90
ตัวอย่างควบคุมบวก	4	0.09 $\pm$ 0.30

การทดสอบสารพิษตกค้างจำนวน 7 กลุ่ม

การทดสอบสารพิษตกค้างจำนวน 7 กลุ่ม ได้แก่ organochlorine group, organophosphate group, pyrethroid group, carbamate group, multiresidue, paraquat และ glyphosate พบว่าไม่มีสารพิษตกค้างในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ดจำนวน 7 กลุ่ม

สารพิษตกค้าง	ผลการทดสอบ	หน่วย	LOD	LOQ
organochlorine group	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
organophosphate group	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
pyrethroid group	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
carbamate group	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
multiresidue	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
paraquat	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10
glyphosate	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	0.05	0.10

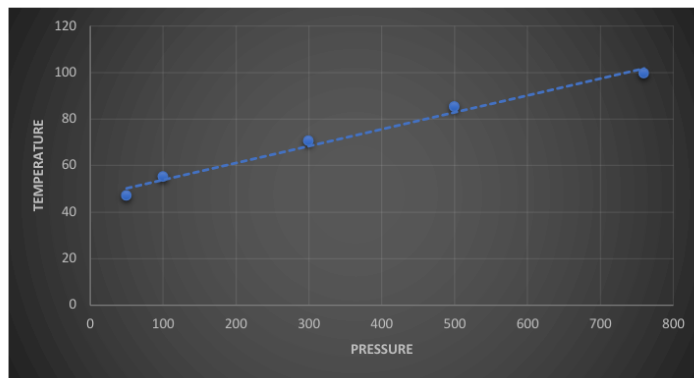
การทดสอบจุดละลายในตัวอย่งสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่เหมาะสมต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

การศึกษาปริมาณจุดเดือดของตัวอย่างสารชีวภัณฑ์

ทำการนำตัวอย่างปุ๋ยชีวภัณฑ์ลงในเครื่องวัดจุดเดือดและวางในตำแหน่งที่เหมาะสมเปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) เพื่อเพิ่มความร้อนอย่างช้า ๆ พร้อมทั้งสังเกตค่าอุณหภูมิบนเทอร์โมมิเตอร์อย่างใกล้ชิด เมื่อของเหลวเริ่มเดือดอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิไว้ หลังจากนั้นทำการวัดจุดเดือดภายใต้สภาวะแรงดันลด โดยเชื่อมต่อบระบบเข้ากับเครื่องวัดสุญญากาศ เพื่อควบคุมและลดแรงดันภายในระบบให้ได้ตามค่าที่ต้องการ เช่น 50, 100 หรือ 200 มิลลิเมตรปรอท ในระหว่างการทดลองต้องควบคุมแรงดันให้คงที่และสังเกตลักษณะการระเหยหรือการเดือดของสารอย่างต่อเนื่อง จากนั้นนำค่าจุดเดือดที่วัดได้ภายใต้แรงดันต่าง ๆ มาแปลงค่าให้เทียบเท่ากับจุดเดือดที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศ โดยใช้สมการ Clausius–Clapeyron หรืออ้างอิงจากข้อมูลเชิงทดลองที่เหมาะสม ผลที่ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การศึกษาจุดเดือดของตัวอย่างปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด

ความดัน (มิลลิเมตรปรอท)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลการทดสอบ
760	99.5	จุดเดือดที่บรรยากาศปกติ
500	85.2	ความดันลดลง ทำให้จุดเดือดต่ำลง
300	70.4	เริ่มแสดงการลดลงของอุณหภูมิจุดเดือด
100	55.0	ใกล้จุดต่ำสุดในการระเหยในสภาวะแรงดันต่ำ
50	47.0	สารเริ่มสลายหรือเจือปนในสถานะแรงดันต่ำสุด



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ โดยแกน Y คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) แกน X คือ ความดัน (มิลลิเมตรปรอท) และจุดวัดแต่ละจุดเชื่อมต่อกันเป็นแนวเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และอุณหภูมิ

ความดันไอระหว่าง 20–25 องศาเซลเซียส

จากผลแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 25 องศาเซลเซียส ความดันไอสารเพิ่มขึ้นประมาณ 4 ปาสกาล (จาก 16.6 เป็น 20.8 ปาสกาล) ค่าความดันย่อยที่วัดได้แสดงว่า สารในตัวอย่างมีความดันไอบรรยากาศอยู่ในช่วง 16.6–20.8 ปาสกาล ที่อุณหภูมิ 20–25 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่าสารมีความสามารถในการระเหยในอุณหภูมิห้องพอสมควร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการทดสอบความดันไอระหว่าง 20–25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พื้นที่ได้ ฟิค	ค่าความเข้มข้นในเฮตสเปซ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)	ความดันย่อย (ปาสกาล)
20.0	1500	0.002	16.6
25.0	2200	0.003	20.8

การทดสอบการกัดกร่อน

จากผลการทดสอบพบว่า ปุ๋ยอัดเม็ดที่ทดสอบมีอัตราการกัดกร่อนประมาณ 0.3 มิลลิเมตรต่อปี ในสภาพแวดล้อมที่เป็นสารละลายปุ๋ยและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอัตราการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโลหะทั่วไปในสภาพแวดล้อมเดียวกัน เช่น เหล็กกล้าที่มีค่าการกัดกร่อนประมาณ 1–2 มิลลิเมตรต่อปี ในสภาพแวดล้อมน้ำเค็มหรือมีออกซิเจนสูง

การทดสอบปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญ

จากการศึกษาปริมาณธาตุอาหารที่สำคัญในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ดผสมเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* พบว่า มีปริมาณจำนวน 6 กลุ่มหลัก ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 696.7, 199.3, 143.3, 1146, 148.4 และ 0.118 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบปริมาณสารสำคัญในตัวอย่างผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์อัดเม็ด

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการ ทดสอบ	ปริมาณธาตุ อาหาร
1	แคลเซียม (Ca)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ICP-OES	696.7
2	แมกนีเซียม (Mg)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ICP-OES	199.3
3	ฟอสฟอรัส (P)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ICP-OES	143.3
4	โพแทสเซียม (K)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ICP-OES	1146
5	ซัลเฟอร์ (S)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ICP-OES	148.4
6	ไนโตรเจน (N)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Kjeldahl method	0.118

การทดสอบการใช้งานจริง

จากการนำสารชีวภัณฑ์ที่ผลิตออกมาจำหน่ายใช้เพาะปลูกผัก ได้แก่ ผักสลัดสีเขียว ผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีแดง โดยทำการปลูกจำนวน 2 แปลง ด้วยกันเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้ฟาร์มอาร์ออร์แกนิก อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยมีการเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ผสมกับสารชีวภัณฑ์ โดยทำการศึกษาเป็นจำนวน 600 ต้น แบ่งแปลงละ 300 ต้น โดยการแบ่งผักสลัดสีเขียว จำนวน 100 ต้น ต่อแปลง ผักสลัดโรเมน จำนวน 100 ต้น และผักสลัดสีแดง จำนวน 100 ต้น โดยแบ่งเป็นจำนวน 2 ซ้ำ ซ้ำละ 100 ต้น พบว่ามีความสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นพืชได้ดี

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรแบบทางเดียวพบว่า กลุ่มการทดลองทั้ง 6 กลุ่ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในด้านความยาวต้นและน้ำหนักต้นสด (Wilks' lambda = 0.218, $F(10, 1186) = 135.48$, $p < 0.001$) และในส่วนรูปแบบการทดลอง (group) ส่งผลต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พบว่าน้ำหนักต้นมีค่า $F = 311.132$ และค่า partial eta squared = 0.724 ซึ่งสูงมากเมื่อทำการเปรียบเทียบจากตารางที่ 7 แสดงว่าปัจจัยด้านชนิดพืชและรูปแบบการใส่สารชีวภัณฑ์ส่งผลต่อน้ำหนักของพืชได้อย่างชัดเจนกว่าความยาวต้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า partial eta squared = 0.338 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลของชนิดพืช สูตรปุ๋ย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อความยาวต้นและน้ำหนักต้นของพืช

Effect	df	F	sig. (p)	partial eta squared
ความยาวต้น	5	60.547	0.00	0.338
น้ำหนัก	5	311.132	0.00	0.724

จากการผลของสารชีวภัณฑ์ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์พืชพบว่า ผักสลัดโรเมนให้ค่าเฉลี่ยด้านความยาวต้นสูงสุด (27.730 เซนติเมตร) และน้ำหนักต้นสดสูงสุด (264.858 กรัม) ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มผักสลัดสีเขียว รองลงมา คือ ผักสลัดสีเขียวเมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยสารชีวภัณฑ์จะให้น้ำหนักสดสูงถึง 248.013 กรัม ซึ่งมีความสูงกว่าชุดการทดสอบอื่นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการปลูกโดยใช้ปุ๋ย

อินทรีย์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้ปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวในทุกชนิดพืช โดยเฉพาะในผักสลัดโรเมน และผักสลัดสีเขียว และในส่วนผลของปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวเกือบทุกชนิด และเมื่อปลูกโดยใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว ผักสลัดสีแดงจะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะในด้านน้ำหนักต้นสดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีค่าเฉลี่ย 113–125 กรัม ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความยาวต้นและน้ำหนักสดของผักที่ใช้ในการใส่ปุ๋ยสารชีวภัณฑ์ผสมปุ๋ยอินทรีย์และใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว

ตัวอย่าง	ความยาวต้น (เซนติเมตร)		น้ำหนักต้นสด (กรัม)	
	ใส่ปุ๋ยชีวภัณฑ์ + ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยอินทรีย์	ใส่ปุ๋ยชีวภัณฑ์ + ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยอินทรีย์
ผักสลัดสีเขียว	23.69 ± 2.15 ^b	22.17 ± 5.43 ^c	248.01 ± 56.24 ^b	113.28 ± 19.17 ^c
ผักสลัดโรเมน	27.73 ± 2.10 ^a	23.96 ± 2.13 ^b	264.85 ± 58.72 ^a	125.09 ± 45.82 ^c
ผักสลัดสีแดง	21.69 ± 2.15 ^c	21.68 ± 2.15 ^c	163.96 ± 77.25 ^c	115.11 ± 21.02 ^c



ภาพที่ 3 ลักษณะแปลงเพาะปลูกผักที่ใช้ปุ๋ยชีวภัณฑ์ผสมปุ๋ยอินทรีย์และใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียว
(ก) ลักษณะแปลงปลูกผักสลัดในโรงเรือนทั้งสองแปลง (ข) ลักษณะของผักสลัดสีแดง
(ค) ลักษณะของผักสลัดโรเมน (ง) ลักษณะของผักสลัดสีเขียว

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชีวเสี้ยว ยางพาราและซังข้าวโพดเป็นตัวกลางในการตรึงเชื้อ *B. subtilis* ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการเจริญเติบโต และการคงอยู่ของจุลินทรีย์ได้ดี โดยมีอัตราการรอดชีวิตของเชื้อเท่ากับ 6.3×10^6 cfu/g ภายในระยะเวลา 3 เดือน สะท้อนถึงความเหมาะสมของวัสดุตัวกลาง (ชีวเสี้ยว ยางพาราและซังข้าวโพด) ในการพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bolan และคณะ [9] ที่ได้มีการนำไบโอชาร์เป็นตัวตรึงของเชื้อแบคทีเรียในรูปแบบพาหะที่มีประสิทธิภาพสำหรับจุลินทรีย์ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะและการคงอยู่ของเชื้อในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ การเคลือบสารไฮโดรเจลจากซังข้าวโพดในอัตราส่วนที่เหมาะสม (1:1) ช่วยเพิ่มความสามารถในการปกป้องเซลล์และควบคุมการปลดปล่อยจุลินทรีย์อย่างช้าและสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการตรึงหรือห่อหุ้มจุลินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและยืดอายุการใช้งานของเชื้อ นอกจากนี้ยังช่วยให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในดินผลการทดสอบด้านความปลอดภัยไม่พบสารพิษตกค้างในกลุ่มสารเคมีทั้ง 7 กลุ่ม รวมถึงโลหะหนัก แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาสารชีวภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปลอดภัยต่อผู้ใช้ และระบบนิเวศในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล ความแข็งปานกลาง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน อีกทั้งยังมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช เช่น ไนโตรเจน (0.118 mg/kg) ฟอสฟอรัส (143.3 mg/kg) โพแทสเซียม (1146 mg/kg) แคลเซียม (696.7 mg/kg) และ แมกนีเซียม (199.3 mg/kg) ซึ่งช่วยเสริมบทบาทของผลิตภัณฑ์ให้เป็นทั้งพาหะของจุลินทรีย์และแหล่งธาตุอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anggraini และคณะ [10] ที่รายงานว่าปุ๋ยที่มีการควบคุมการปลดปล่อยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืช ได้ผลการทดสอบภาคสนามพบว่า การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับสารชีวภัณฑ์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของผักสลัดทั้ง 3 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะด้านน้ำหนักต้นซึ่งมีค่าอิทธิพลสูงที่สุดและยังช่วยลดอัตราการเกิดโรคได้อย่างชัดเจน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [11] ที่รายงานว่าเชื้อ *Bacillus* สามารถผลิตเอนไซม์และสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรคพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการรอดชีวิตของเชื้อซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia และคณะ [12] ที่พบว่าการใช้วัสดุพาหะที่เหมาะสมสามารถช่วยรักษาปริมาณเชื้อ *B. subtilis* ให้อยู่ในระดับสูงได้เป็นเวลานานภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาปุ๋ยสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดโดยใช้เศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชีวเสี้ยว ยางพารา และซังข้าวโพด เป็นวัสดุตัวกลางสำหรับตรึงเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* ผลการทดลองพบว่าวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของเชื้อได้ดี โดยหลังการเก็บรักษา 3 เดือน ยังคงมีปริมาณเชื้ออยู่ที่ 6.3×10^6 CFU/g แสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภัณฑ์อัดเม็ด นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแรง สมำเสมอ และเหมาะสมต่อการขนส่งและการใช้งานจริง รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนและไม่พบสารพิษตกค้างหรือโลหะหนักทำให้มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุอาหารพบว่าผลิตภัณฑ์มี

ธาตุอาหารหลักหลายชนิด เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จึงสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งพาหะจุลินทรีย์และแหล่งธาตุอาหารเสริมให้พืชได้ ในการทดสอบภาคสนามกับผักสลัด 3 ชนิด การใช้สารชีวภัณฑ์ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและโดยเฉพาะในผักสลัดโรเมนที่ตอบสนองต่อสารชีวภัณฑ์ได้ดีที่สุด โดยสรุปสารชีวภัณฑ์อัดเม็ดที่พัฒนาขึ้นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีศักยภาพสูงในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและสนับสนุนการทำเกษตรอินทรีย์อย่างยั่งยืนทั้งยังเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้ทางการเกษตรและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. (2567). สถิติสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย พ.ศ.2567 (E-book) [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.nso.go.th/public/e-book/Indicators-Environment/Environment-Indicators-2567/> (15 ธันวาคม 2568)
- [2] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2568). ปุ๋ยเคมีไทย ปี 2568 ยอดขายชะลอตัว ตามปัจจัยบวกที่แผ่วลง. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/Fertilizer-IAO130-FB-08-05-25.aspx> (15 ธันวาคม 2568).
- [3] ลัดดาวัลย์ เฉลิมแสนยากร. (2568). แนวโน้มธุรกิจปุ๋ยเคมีไทย 2568. [ออนไลน์], สืบค้นจาก <https://media.setgroup.or.th/setlink/Documents/2025/May/แนวโน้มธุรกิจปุ๋ยเคมีไทย.pdf> (20 ธันวาคม 2568).
- [4] กฤติเดช อนันต์ และดุสิต อธิวัฒน์. (2559). การพัฒนาชีวภัณฑ์จาก *Bacillus subtilis* TU-Orga1 เพื่อควบคุมโรคที่สำคัญของผักคะน้า. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24(5), 793–812.
- [5] ดารุณี สาทะ และรอฮายู ฮะกือลิง. (2564). ผลของฟางข้าวและขี้เลื่อยยางพาราเสริมด้วยเชื้อเห็ดแก่ต่อผลผลิตของเห็ดฟางในตะกร้าพลาสติก. รายงานวิจัย. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์.
- [6] มณีนรัตน์ คูหาพิทักษ์ธรรม. (2562). การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการเกิดโรคของเชื้อรา *Phytophthora palmivora* สาเหตุโรครากเน่าและโคนเน่าของทุเรียนในประเทศไทย. รายงานการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี.
- [7] OECD. (2010). Test No.439: In vitro Skin Irritation : Reconstructed Human Epidermis Test Method. OECD Publishing, Paris.
- [8] Collimere, W. & Bent, G. (2020). A newly modified QuEChERS method for the analysis of organochlorine and organophosphate pesticide residue fruits and vegetables. *Journal Enviromental Monitoring and Assessment*. 192 (2).
- [9] Bolan, S., Hou, D., Wang, L., Hale, L., Egamberdieva, D., Tammeorg, P., Li, R., Wang, B., Xu, J., Wang, T., Sun, H., Padhye, L. P., Wang, H., Siddique, K. H. M., Rinklebe, J., Kirkham, M. B., & Bolan, N. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment*, 886, 163968.

- [10] Anggraini, R. A., Kurniati, M., Winarti, C. & Iramansyah, I. (2021). The release of fertilizer on corncob cellulose – based acid- acrylamide hydrogel prepared by chemical cross-binding method. *Journal Reaktor*, 21(3), 109–115.
- [11] Chen, T. Y., Tzean, Y., Chang, T. D., Wang, X. R., Yang, C. M. & Lin, Y. H. (2024). Characterization of biofertilization and biocontrol potential of *Bacillus velezensis* KHH13 from organic soils. *Agronomy*, 14(6), 1–17
- [12] Jia, H., Lv, X., Sohail, M. A., Huang, B. & Wang, J. (2022). Control efficiency of biochar Loaded with *Bacillus subtilis* Tpb 55 against tobacco black shank. *Processes*, 10(12), 1–12.